

KONSTRUKCIJA KLASIČNOG NAORUŽANJA

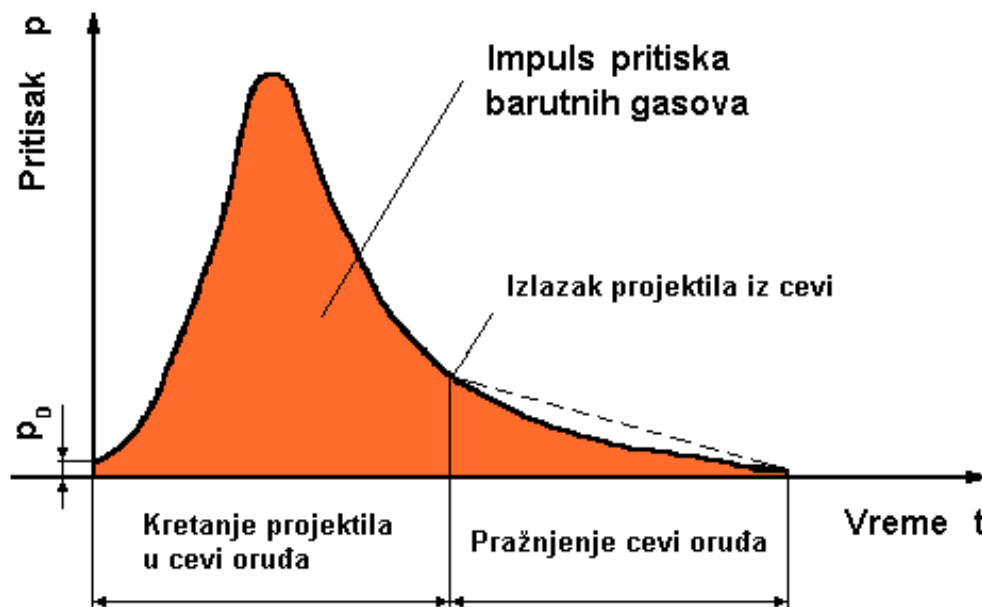
SILE KOJE DELUJU NA CEV ORUĐA PRI OPALJENJU

Pri opaljenju na zidove barutne komore i cevi artiljerijskog oruđa deluju sledeće sile:

1. Sila pritiska barutnih gasova
2. Sila međusobnog dejstva projektila i cevi
3. Sile reakcije klevke, protivtrzajućeg uređaja i gasne kočnice.

Polazna osnova za analizu svih sila i pojava kretanja oruđa tokom procesa opaljenja je promena tokom vremena sila koje se na cev oruđa prenose posredstvom barutnog punjenja i projektila (1. i 2.).

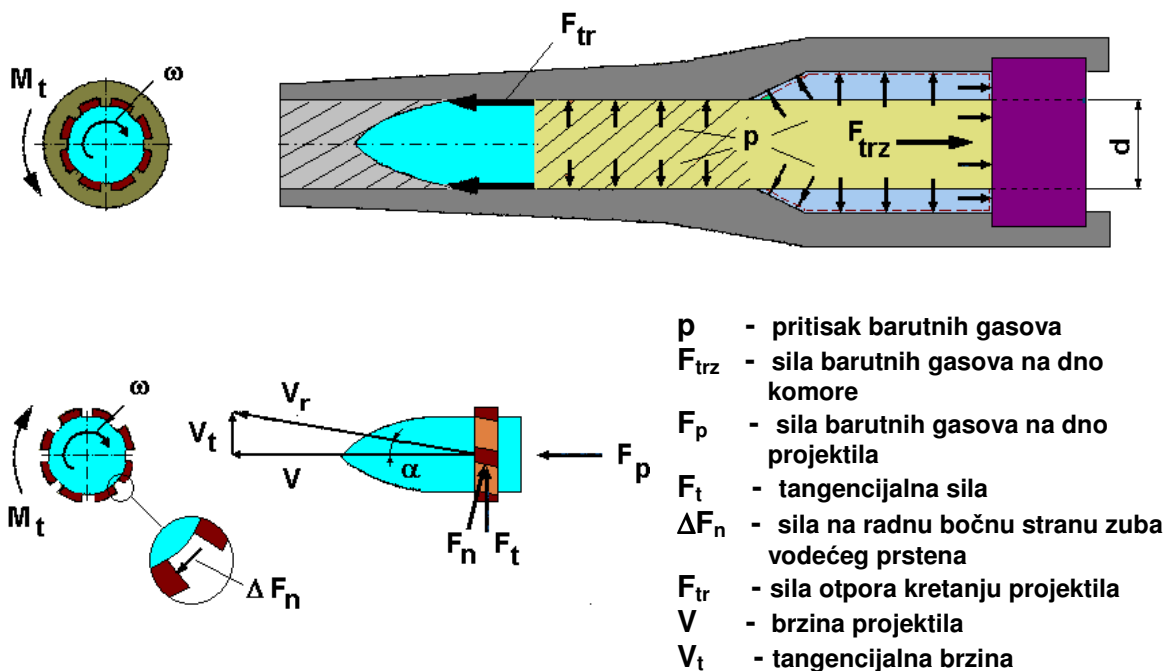
Odlučujući uticaj na kretanje projektila ima promena pritiska barutnih gasova u barutnoj komori i cevi oruđa do trenutka izlaska projektila kroz usta cevi. Ova promena može biti predstavljena krivom $p=f(t)$ (slika 1). Značajan uticaj na kretanje cevi oruđa sa lafetom koji omogućava trzanje ima i dejstvo barutnih gasova tokom pražnjenja cevi nakon izlaska projektila. Ovaj period "naknadnog" dejstva barutnih gasova traje dok pritisak u cevi ne opadne do atmosferskog pritiska. Za analizu trzanja pokretljive cevi značajan je totalni impuls pritiska $\int p \, dt$ (površina ispod krive $p=f(t)$).



Slika 1. Kriva pritiska barutnih gasova u cevi oruđa tokom opaljenja

Kretanje projektila u cevi oruđa počinje kada se u barutnoj komori postigne pritisak koji obezbeđuje silu potrebnu za urezivanje vodećeg prstena projektila (pritisak forsiranja p_0).

Pritisak barutnih gasova na zidove cevi deluje u pravcu normale na površini cevi (slika 2). On nema uticaja na trzanje, već izaziva naprezanja cevi oruđa. Ovde ćemo analizirati samo rezultujuće sile koje su krucijalne za kretanje trzajućih delova i opterećenje lafeta oruđa. U ovom slučaju sve radijalne sile pritiska su očigledno u statičkoj ravnoteži. Isto važi za horizontalne komponente sile pritiska koje deluju na unutrašnje površine barutne komore, što je pokazano isprekidanom linijom na slici 2.



Slika 2. Sile koje deluju na cev oruđa od strane barutnog punjenja i projektila

Glatka cev

U slučaju glatke cevi sledeće sile nisu uravnotežene:

1. Sila pritiska barutnih gasova na kružnu površinu dna barutne komore prečnika jednakog kalibru cevi d (a NE na kružnu površinu celog dna barutne komore), odnosno sila trzanja:

$$F_{trz} = \frac{d^2 \pi}{4} p \quad (1)$$

2. Sila otpora kretanju projektila F_{tr} koja nastaje kao posledica trenja vodećeg (zaptivnog) prstena pri kretanju projektila kroz cev oruđa. Kod glatkih cevi sila otpora F_{tr} je manja od 1 % vrednosti sile trzanja F_{trz} , tako da se u razmatranjima kretanja trzajućih delova može zanemariti.

Žljebljena cev

Kod žljebljene cevi površina poprečnog preseka cevi koja je na raspolaganju barutnim gasovima je nešto veća zbog žljebova. Sila trzanja je u ovom slučaju:

$$F_{trz} = A_s p = n_s d^2 p \quad (2)$$

U nedostatku preciznih podataka o žljebljenju može približno uzeti $n_s = 0.80 \div 0.82$.

Kod cevi sa uglom uvijanja α tačka na vodećem prstenu (sl. 2 dole) kreće se u pravcu određenom rezultantnom brzinom V_r . Tangencijalna brzina i ubrzanje projektila su:

$$\begin{aligned} V_t &= V \operatorname{tg} \alpha \\ a_t &= a \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

a ugaono ubrzanje projektila je

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a \operatorname{tg} \alpha}{d/2} \quad (4)$$

Prema osnovnoj jednačini dinamike za obrtno kretanje, obrtni moment na vodećem prstenu projektila sa polarnim masenim momentom inercije I_p je:

$$M_t = I_p \frac{d\omega}{dt} = I_p \frac{a \operatorname{tg} \alpha}{d/2} \quad (5)$$

Ubrzanje projektila mase m_p pod dejstvom sile barutnih gasova na dno F_p , ako se zanemari otpor kretanju projektila je približno:

$$a \approx \frac{F_p}{m_p} \quad (6)$$

Uvođenjem $I_p = m_p i^2$ (i - poluprečnik inercije projektila) jednačina (5) postaje:

$$M_t = i^2 F_p \frac{\operatorname{tg} \alpha}{d/2} \quad (7)$$

Ukupna tangencijalna sila na vodećem prstenu je:

$$F_t = \frac{M_t}{d/2} = \left(\frac{i}{d/2} \right)^2 F_p \operatorname{tg} \alpha \quad (8)$$

Odnos $\frac{i}{d/2}$ je karakteristika projektila. Za projektele parčadno-rušećeg dejstva može se

uzeti $\left(\frac{i}{d/2} \right)^2 \approx 0.53$.

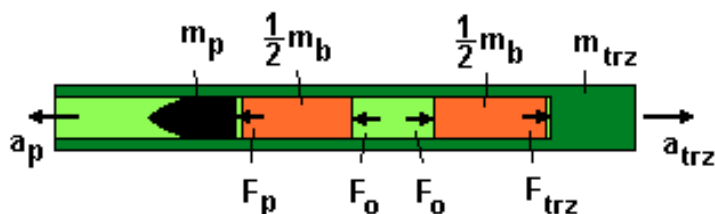
Na cev oruđa deluje obrtni moment istog intenziteta kao na vodećem prstenu (jedn. 7), ali u obrnutom smeru od rotacije projektila (sl. 2 gore). U slučaju rotacije projektila udesno, na cev deluje obrtni moment u smeru obrnutom od kazaljke na satu (gledano u pravcu gađanja).

Sila pritiska barutnih gasova na dno projektila F_p je nešto manja od sile pritiska barutnih gasova na dno barutne komore (zatvarač) F_{trz} , zato što se deo energije troši na ubrzavanje barutnih gasova. Za približno određivanje sile F_p upotrebicemo konceptualni model prikazan na slici 3.

Prema ovom modelu predpostavljamo da se polovina barutnog punjenja kreće za projektilom dobijajući ubrzanje projektila a_p , a druga polovina barutnog punjenja se kreće zajedno sa trzajućim delovima ubrzanjem a_{trz} . Prema osnovnoj jednačini mehanike, sile kojom barutni gasovi izazivaju ova ubrzanja su:

sa desne strane $F_{trz} = m_{trz} a_{trz}$ (9)

$$F_0 = \left(m_{trz} + \frac{m_b}{2} \right) a_{trz} = \frac{m_{trz} + \frac{m_b}{2}}{m_{trz}} F_{trz} \quad (10)$$



m_{trz}	- masa trzajućih delova	F_p	- sila barutnih gasova na dno projektila
m_p	- masa projektila	F_0	- sila gasova u sredini barutnog punjenja
m_b	- masa barutnog punjenja	a_{trz}	- ubrzanje trzajućih delova
F_{trz}	- sila barutnih gasova na zatvarač	a_p	- ubrzanje projektila

Slika 3. Konceptualni model za određivanje sile F_p

pošto je $m_b \ll m_{trz} \Rightarrow F_0 \approx F_{trz}$ (10a)

sa leve strane $F_p = m_p a_p$ (11)

$$F_0 = \left(m_p + \frac{m_b}{2} \right) a_p = \frac{m_p + \frac{m_b}{2}}{m_p} F_p \quad (12)$$

Iz jednačina (10a) i (12) sledi da je

$$F_p \approx \frac{m_p}{m_p + \frac{m_b}{2}} F_{trz} \quad (13)$$

Sila koja deluje na vodeći prsten projektila pri kretanju kroz ožljebljenu cev (n - broj žljebova) jednaka je zbiru elementarnih sila na radnu bočnu stranu zuba vodećeg prstena je:

$$F_n = n \Delta F_n$$

Ova sila deluje normalno na žleb, tako da je ugao između pravca ove sile i pravca tangencijalne sile ugao uvijanja žljebova α . Pri kretanju projektila javlja se sila trenja između cevi i vodećeg prstena projektila u pravcu tangente na žleb.

U praksi se ugao uvijanja žljebova kreće približno u granicama $\alpha \approx 4^\circ \div 8^\circ$, tako da je $\text{tg}\alpha \approx 0.070 \div 0.141$. Prema jednačini (8) odnos tangencijalne sile i sile na dno projektila je:

$$F_t \sim (0.04 \div 0.08) F_p$$

Pošto su vrednosti $\text{tg}\alpha$ i F_t/F_p relativno male, može se sa dovoljnom tačnošću za proučavanje kretanja trzajućih delova usvojiti da je sila trenja između vodećeg prstena i cevi približno jednaka $f \cdot F_t$, a komponenta sile F_n u pravcu gađanja približno jednaka $F_t \cdot \text{tg}\alpha$. Koeficijent trenja između bakarnog vodećeg prstena i cevi je $f \sim 0.15$.

Sada je ukupna sila otpora kretanju projektila kroz ožlebljenu cev (odnosno sila kojom projektil deluje na ožlebljenu cev u pravcu njene ose) približno jednaka:

$$F_{tr} \approx (f + \text{tg}\alpha) F_t \quad (14)$$

ili koristeći jednačinu (8):

$$F_{tr} \approx \left(\frac{i}{d/2} \right)^2 (f + \text{tg}\alpha) F_p \text{tg}\alpha \quad (14a)$$

Primer 1: Haubica 105 mm

Kalibar	$d = 105 \text{ mm}$
Konstantan ugao uvijanja žljebova	$\alpha = 7^\circ$
Masa projektila	$m_p = 15.0 \text{ kg}$
Masa barutnog punjenja	$m_b = 3.0 \text{ kg}$
Masa trzajućih delova	$m_{trz} = 750 \text{ kg}$
Maksimalni pritisak barutnih gasova na zatvarač	$p_{m,z} = 2600 \text{ bar}$

Površina poprečnog preseka cevi:

$$A_s = n_s d^2 = 0.81 \cdot 0.105^2 = 8.93 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Maksimalna sila barutnih gasova na zatvarač (sila trzanja):

$$(F_{trz})_{\max} = A_s \cdot p_{m,z} = 8.93 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2) \cdot 2600 \cdot 10^5 (\text{N/m}^2) = 2322 \text{ kN}$$

Maksimalna sila barutnih gasova na dno projektila:

$$(F_p)_{\max} = \frac{m_p}{m_p + \frac{m_b}{2}} (F_{trz})_{\max} = \frac{15.0}{15.0 + \frac{3.0}{2}} 2322 = 2111 \text{ kN}$$

Maksimalni obrtni moment:

$$(M_t)_{\max} = \left(\frac{i}{d/2} \right)^2 (d/2) (F_p)_{\max} \text{tg}\alpha = 0.53 \cdot 0.0525 \cdot 2111 \cdot 10^3 \cdot 0.123 = 7225 \text{ Nm}$$

Maksimalna sila otpora kretanju projektila:

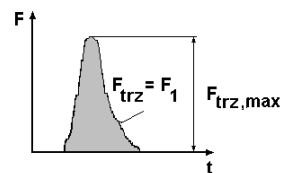
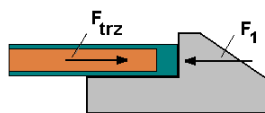
$$(F_{tr})_{\max} \approx \left(\frac{i}{d/2} \right)^2 (f + \text{tg}\alpha) (F_p)_{\max} \text{tg}\alpha \approx 0.53 \cdot (0.15 + 0.123) \cdot 2111 \cdot 10^3 \cdot 0.123 \approx 37,6 \text{ kN}$$

SILE KOJE DELUJU NA LAFET ORUĐA PRI OPALJENJU

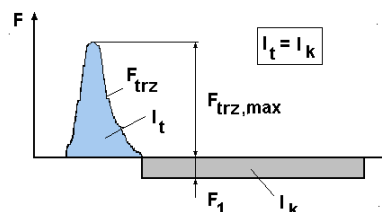
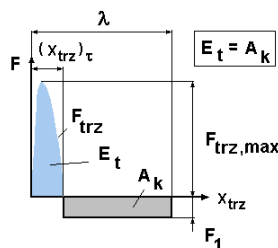
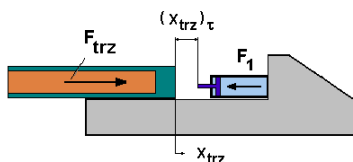
Tipovi lafeta

Dejstvo sila koje se preko cevi oruđa prenosi na lafet zavisi od tipa lafetiranja oruđa. Na slici 4 dat je šematski pregled karakterističnih slučajeva lafetiranja oruđa.

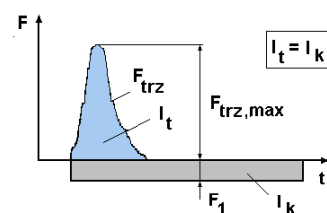
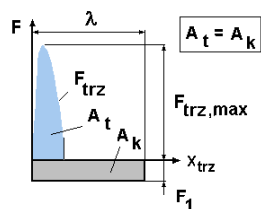
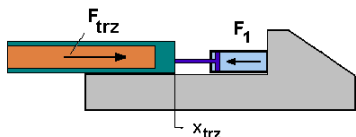
1. Kruti lafet



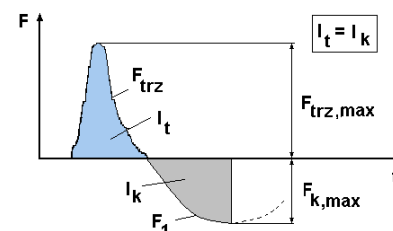
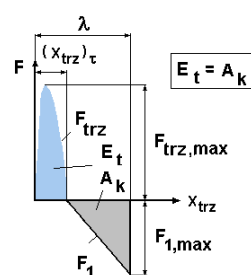
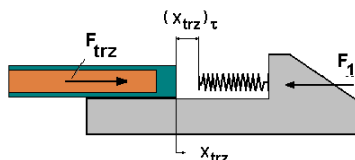
2. Slobodno trzanje sa kočenjem nakon završetka isticanja barutnih gasova



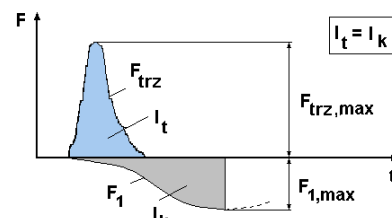
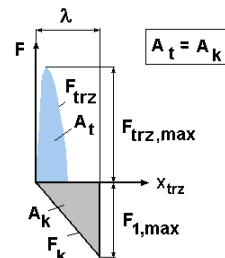
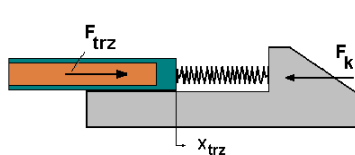
3. Kočenje od početka trzanja



4. Slobodno trzanje sa amortizovanjem nakon završetka isticanja barutnih gasova



5. Amortizovanje od početka trzanja



E_t - energija trzanja
 A_t - rad sile barutnih gasova
 A_k - rad kočenja

I_t - impuls sile barutnih gasova
 I_k - impuls kočenja

Slika 4. Šematski prikaz tipova lafetiranja oruđa

Na slici 4 šematski je prikazan karakter prenosa sile na lafet. Na dijagramima sila-put prikazane su sila trzanja (F_{trz}), nastala kao rezultat dejstva barutnih gasova, i sila F_1 kojom se lafet suprotstavlja trzanju. Dijagrami sila-vreme prikazuju s jedne strane promenu istih sila trzanja $F_{trz} = f(t)$, a sa druge strane odgovarajuća opterećenja lafeta $F_1 = f(t)$.

Sile otpora kretanju projektila nisu uzete u obzir u ovim razmatranjima, pošto su one od sekundarnog značaja u odnosu na sile trzanja. ($F_{tr} \ll F_{trz}$, vidi primer 1).

Pošto je u slučaju krutog lafeta (sl.4-1) sila kojom se lafet suprotstavlja trzanju u svakom trenutku jednaka sili trzanja ($F_1 = F_{trz}$), ovakav način lafetiranja bi u opštem slučaju dovodio do nepodnošljivo visokih opterećenja lafeta. Tako bi maksimalno opterećenje lafeta haubice 105 mm iz primera 1 bilo $F_{1,max} = F_{trz,max} = 2322$ kN.

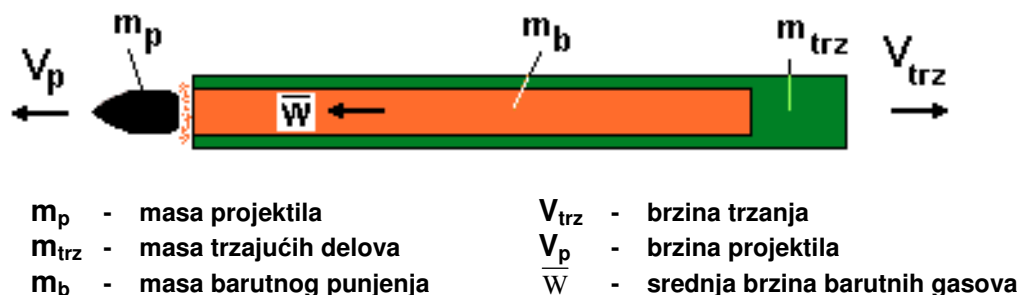
Zato se kod svih teških oruđa i kod mnogih lakih oruđa u praksi primenjuje princip dugačkog trzanja (sl.4-2 i sl.4-3), kod koga se cev oruđa pod dejstvom sile barutnih gasova kreće unazad duž vođica kolevke. Na ovaj način sila barutnih gasova deluje unazad samo kao sila koja ubrzava kretanje trzajućih delova. Akumuliranu kinetičku energiju trzajućih delova apsorbuje hidraulički generisana sila kočenja duž određenog puta trzanja. Sila kočenja se sada najvećim delom javlja kao opterećenje lafeta, umesto sile barutnih gasova (sile trzanja). Izborom odgovarajućeg dugačkog puta kočenja opterećenje lafeta može značajno da se smanji u odnosu na opterećenje krutog lafeta.

Određivanje elemenata kretanja trzajućih delova u slučaju slobodnog trzanja (kretanje bez ikakvog kočenja) je veoma značajno kao polazna osnova za precizan proračun opterećenja oruđa sa elastičnim lafetiranjem.

Elementi kretanja pri slobodnom trzanju

Kretanje trzajućih delova pri slobodnom trzanju počinje pod dejstvom sile barutnih gasova (sile trzanja - F_{trz}) istovremeno sa kretanjem projektila u cevi. Elementi slobodnog trzanja su brzina i put trzanja.

Maksimalna brzina slobodnog trzanja može sasvim jednostavno da se odredi, čak i bez preciznog poznavanja krive promene sile barutnih gasova, na osnovu razmatranja količine kretanja. Potrebno je samo znati mase trzajućih delova, projektila i barutnog punjenja, kao i početnu brzinu projektila.



Slika 5. Mase i brzine tokom opaljenja

Na slici 5 je šematski je prikazan maseni sistem u toku procesa opaljenja, koji se sastoji od projektila mase m_p , barutnog punjenja i/ili barutnih gasova mase m_b i cevi

(odnosno trzajućih delova) mase m_{trz} . Pošto sve gasne sile i sile trenja predstavljaju unutrašnje sile sistema, i pošto se težinske sile mogu zanemariti čak i za nehorizontalno opaljenje, impuls spoljnih sila je jednak nuli.

Prema zakonu održanja količine kretanja masenog sistema biće

$$\sum(mV) = \text{const}$$

odnosno pošto je sistem bio u stanju mirovanja pre opaljenja

$$\sum(mV) = 0 \quad (15)$$

U svakom trenutku opaljenja prikazanog na slici 5 suma količina kretanja usmerenih udesno biće jednaka sumi količina kretanja usmerenih ulevo:

$$m_{trz} V_{trz} = m_p V_p + m_b \overline{W} \quad (16)$$

Ukupna količina kretanja barutnih gasova i barutnih zrna koji struje različitim brzinama određena je proizvodom mase punjenja m_b i srednje brzine strujanja $\overline{W}$. **U trenutku izlaska projektila iz cevi** (indeks u) je $V_p = V_0$, pa je tada brzina strujanja barutnih gasova na dnu projektila $W = V_0$, a na dnu barutne komore $W \approx 0$ (ako se zanemari

brzina trzanja koja je daleko manja od početne brzine projektila V_0). Zato je $\overline{W} \approx \frac{V_0}{2}$ pa jednačina (16) postaje

$$m_{trz} (V_{trz})_u = m_p V_0 + m_b \frac{V_0}{2} \quad (17)$$

Sada je brzina trzanja u trenutku izlaska projektila iz cevi

$$(V_{trz})_u = \frac{m_p + 0.5 m_b}{m_{trz}} V_0 \quad (18)$$

Pritisak barutnih gasova na dno projektila naglo opada nakon izlaska projektila iz cevi, tako da se **na kraju isticanja barutnih gasova iz cevi** (indeks τ) može smatrati da je $V_p \approx V_0$. Srednja brzina isticanja barutnih gasova tokom pražnjenja cevi $\overline{W}$, od koje zavisi količina kretanja barutnih gasova $m_b \overline{W}$, može da se odredi samo na osnovu detaljnog unutrašnjebalističkog proračuna. Sledeća formula daje dobru aproksimaciju srednje brzine isticanja:

$$\overline{W} = \sqrt{V_0^2 + \overline{C}^2} \quad (19)$$

gde je srednja lokalna brzina zvuka u barutnim gasovima na ustima cevi tokom pražnjenja $\overline{C} \approx 1000 \text{ m/s}$. Praktične približne vrednosti $\overline{W}$ kreću se u opsegu $\overline{W} \approx 1200 \div 1400 \text{ m/s}$.

Ako uvedemo u razmatranje koeficijent dejstva barutnih gasova na trzajuće delove β definisan relacijom

$$\overline{W} = \beta V_0 \quad (20)$$

jednačina održanja količine kretanja (jedn. 16) postaje

$$m_{\text{trz}} (V_{\text{trz}})_\tau = m_p V_p + m_b \beta V_0 \quad (21)$$

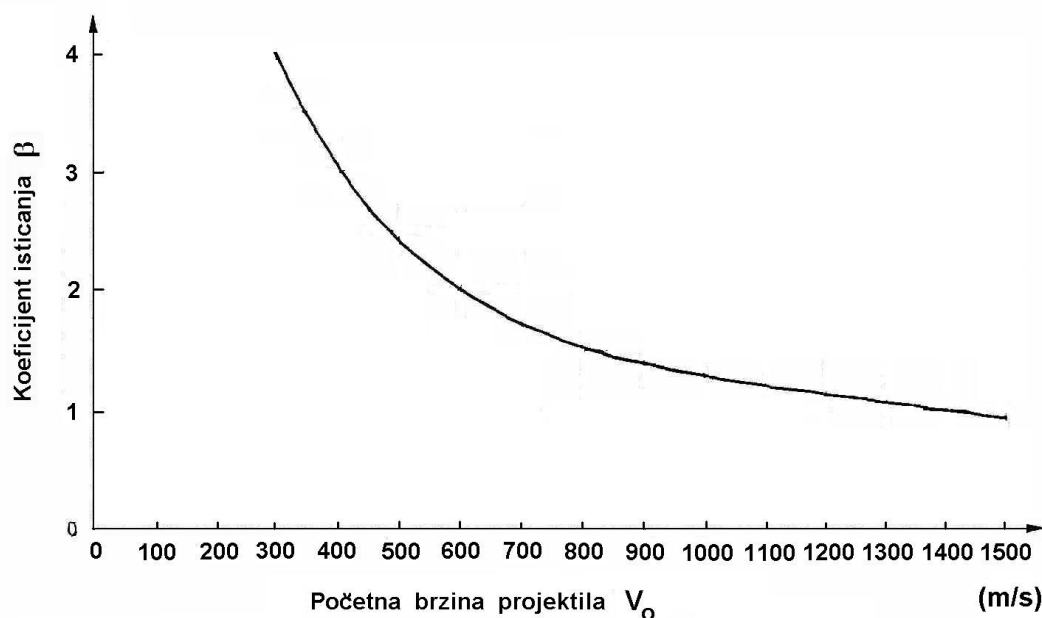
tako da je brzina trzanja na kraju perioda isticanja barutnih gasova

$$(V_{\text{trz}})_\tau = \frac{m_p + \beta m_b}{m_{\text{trz}}} V_0 \quad (22)$$

Praktične približne vrednosti koeficijenta dejstva barutnih gasova na trzajuće delove su

$$\beta \approx \frac{1200}{V_0} \div \frac{1400}{V_0} \quad (23)$$

gde donja granica važi za manje vrednosti V_0 ($V_0 < 800$ m/s), a gornja granica za veće vrednosti V_0 ($V_0 > 1200$ m/s) (slika 6).



Slika 6. Približno određivanje koeficijenta isticanja barutnih gasova

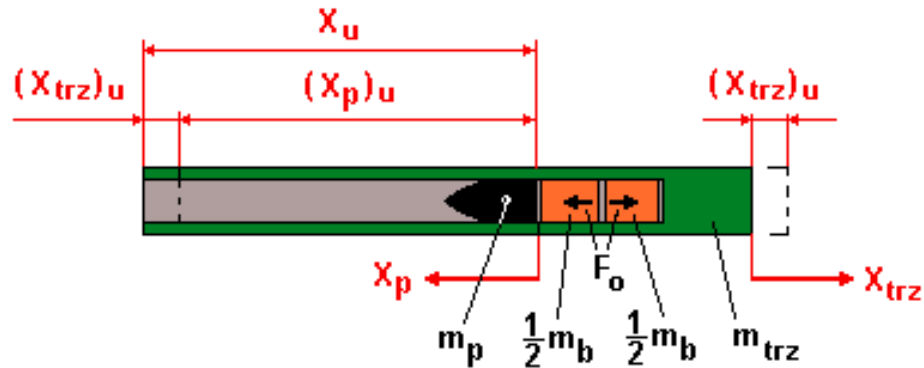
Ukupan put trzanja sastoji se od puta trzanja do izlaska projektila iz cevi $(X_{\text{trz}})_u$ i puta trzanja tokom isticanja barutnih gasova iz cevi $(X_{\text{trz}})_i$:

$$(X_{\text{trz}})_\tau = (X_{\text{trz}})_u + (X_{\text{trz}})_i \quad (24)$$

a) Put trzanja do izlaska projektila iz cevi ($X_{trz})_u$

U odsustvu spoljnih sila prema zakonu o održanju količine kretanja položaj zajedničkog centra mase projektila i cevi se ne menja tokom opaljenja, tako da se u ovom slučaju može primeniti konceptualni model sa slike 3 (vidi skicu 7). Sada je

$$\frac{X_p}{X_{trz}} = \frac{m_{trz} + \frac{m_b}{2}}{m_p + \frac{m_b}{2}} \quad (25)$$



- | | | | |
|-----------|--------------------------|---------------|---|
| m_p | - masa projektila | $(X_{trz})_u$ | - put trzanja (u trenutku izlaska projektila) |
| m_{trz} | - masa trzajućih delova | $(X_p)_u$ | - put projektila |
| m_b | - masa barutnog punjenja | X_u | - put projektila u odnosu na cev |

Slika 7. Put projektila X_p i put trzanja X_{trz}

U trenutku izlaska projektila iz cevi pređeni put projektila u odnosu na cev je

$$X_u = (X_{trz})_u + (X_p)_u = (X_{trz})_u \left[1 + \left(\frac{X_p}{X_{trz}} \right)_u \right] \quad (26)$$

Uvođenjem jednačine (25) dobijamo

$$X_u = (X_{trz})_u \frac{\left(m_p + \frac{m_b}{2} \right) + \left(m_{trz} + \frac{m_b}{2} \right)}{m_p + \frac{m_b}{2}} \quad (27)$$

put trzanja do izlaska projektila iz cevi je

$$(X_{trz})_u = \frac{m_p + \frac{m_b}{2}}{m_{trz} + m_p + m_b} X_u \quad (28)$$

b) Put trzanja tokom isticanja barutnih gasova (X_{trz})_i

Put trzanja u periodu pražnjenja cevi određuje se na osnovu impulsa sile barutnih gasova. Ako se pretpostavi linearna promena sile barutnih gasova tokom pražnjenja cevi (odnosno pritiska - slika 1) impuls ove sile će biti:

$$I_{ist} = \frac{p_u A_s t_{ist}}{2} \quad (29)$$

gde su p_u - pritisak barutnih gasova u trenutku izlaska projektila iz cevi
 A_s - površina poprečnog preseka cevi
 t_{ist} - vreme pražnjenja cevi

Impuls sile barutnih gasova tokom isticanja jednak je promeni količine kretanja trzajućih delova:

$$I_{ist} = m_{trz} [(V_{trz})_{\tau} - (V_{trz})_u] \quad (30)$$

Uvođenjem jednačina (18) i (22) u jednačinu (30) dobija se:

$$I_{ist} = (\beta - 0.5) m_b V_0 \quad (31)$$

Iz jednačine (29) dobija se sada vreme pražnjenja cevi

$$t_{ist} = \frac{(\beta - 0.5) m_b V_0}{\frac{p_u A_s}{2}} \quad (32)$$

Iako promena brzine trzajućih delova tokom pražnjenja cevi nije linearna, može se za put trzanja u ovom periodu usvojiti kao dobra aproksimacija:

$$(X_{trz})_i \approx \frac{(V_{trz})_u + (V_{trz})_{\tau}}{2} t_{ist} \quad (33)$$

Tačnija vrednost puta trzanja može se dobiti integraljenjem Vallier - ove pretpostavljene krive pritiska barutnih gasova na ustima cevi:

$$(X_{trz})_i = \left[\frac{(V_{trz})_u + (V_{trz})_{\tau}}{2} + \frac{(V_{trz})_{\tau} - (V_{trz})_u}{6} \right] t_{ist} \quad (34)$$

Primer 2: Haubica 105 mm (kao u primeru 1)

Početna brzina projektila	$V_0 = 630 \text{ m/s}$
Masa projektila	$m_p = 15.0 \text{ kg}$
Masa barutnog punjenja	$m_b = 3.0 \text{ kg}$
Masa trzajućih delova	$m_{trz} = 750 \text{ kg}$
Dužina puta projektila u cevi	$X_u = 2.6 \text{ m}$
Pritisak barutnih gasova na ustima cevi u trenutku izlaska projektila	$p_u = 730 \text{ bar}$

Koeficijent dejstva barutnih gasova na trzajuće delove je

$$\beta \approx \frac{1200}{630} = 1.9$$

Brzina trzajućih delova u trenutku izlaska projektila:

$$(V_{trz})_u = \frac{15 + 0.5 \cdot 3.0}{750} \cdot 630 = 13.9 \frac{m}{s}$$

Brzina trzajućih delova u trenutku praznjenja cevi:

$$(V_{trz})_\tau = \frac{15 + 1.9 \cdot 3.0}{750} \cdot 630 = 17.4 \frac{m}{s}$$

Površina poprečnog preseka cevi $A_S = 8.93 \cdot 10^{-3} m^2$ izračunata je u primeru 1.

Približno vreme kretanja projektila u cevi:

$$t_u \approx \frac{2X_u}{V_0} = \frac{2 \cdot 2.6}{630} \approx 8.3 \cdot 10^{-3} s$$

Preciznija vrednost vremena kretanja projektila u cevi dobija se iz unutrašnjebalističkog proračuna: $t_u = 9.3 \cdot 10^{-3} s$

Trajanje praznjenja cevi:

$$t_{ist} = \frac{(1.9 - 0.5) \cdot 3.0 \cdot 630}{\frac{730 \cdot 10^5 \cdot 8.93 \cdot 10^{-3}}{2}} = 8.2 \cdot 10^{-3} s$$

Vreme trajanja dejstva barutnih gasova

$$\tau = t_u + t_{ist} = (9.3 + 8.2) \cdot 10^{-3} = 17.5 \cdot 10^{-3} s$$

Put trzanja za vreme kretanja projektila u cevi

$$(X_{trz})_u = \frac{15 + 1.5}{750 + 15 + 3} \cdot 2.6 = 0.056 m$$

Put trzanja za vreme praznjenja cevi

$$(X_{trz})_i = \left(\frac{13.9 + 17.4}{2} + \frac{17.4 - 13.9}{6} \right) \cdot 8.2 \cdot 10^{-3} = 0.133 m$$

Ukupni put trzanja do trenutka prestanka dejstva barutnih gasova

$$(X_{trz})_\tau = 0.056 + 0.133 = 0.189 m$$

Potrebna sila koćenja pri slobodnom trzanju tokom dejstva barutnih gasova

(slika 4 - 2)

Kod ovog sistema cev oruđa se slobodno trza sve do potpunog prestanka dejstva barutnih gasova, kada započinje koćenje trzajućih delova od brzine koju oni imaju u tom trenutku do njihovog potpunog zaustavljanja. Ovakav metod bi imao značajnih nedostataka u praksi, jer zahteva da sila koćenja počne naglo da deluje pri velikoj brzini trzanja. Zato se ovakav sistem koćenja ne koristi u konstrukciji oruđa, ali će biti razmotren jer predstavlja osnovu za proračun sistema sa slike 4 -3, koji je od praktičnog značaja.

Veličina potrebne sile koćenja može da odredi u funkciji vremena iz jednačine impulsa, ili da se odredi u funkciji puta trzanja iz jednačine energije. Ovaj poslednji način preovlađuje u praksi, jer su hidraulične kočnice trzanja projektovane tako da daju određenu zavisnost sile koćenja od puta trzanja. Pored toga, maksimalna dužina trzanja je veoma važan parametar konstrukcije oruđa.

Na osnovu maksimalne brzine slobodnog trzanja (jedm. 22) dobija se kinetička energija trzajućih delova u trenutku završetka dejstva barutnih gasova

$$(E_t)_\tau = \frac{m_{trz}}{2} (V_{trz})_\tau^2 = \frac{(m_p + \beta m_b) V_0^2}{2} \cdot \frac{m_p + \beta m_b}{m_{trz}} \quad (35)$$

Energija trzajućih delova je približno jednaka kinetičkoj energiji projektila na ustima cevi $m_p V_0^2/2$ pomnoženoj sa odnosom m_p/m_{trz} , pri čemu je umesto mase projektila m_p uvedena veličina $m_p + \beta m_b$.

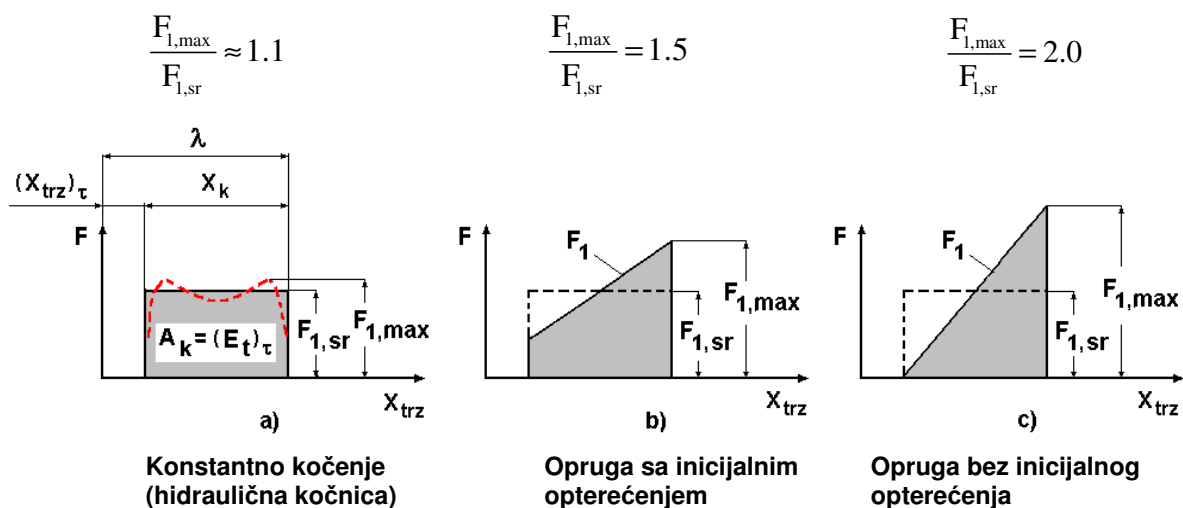
Energija trzanja može da se smanji tako što se poveća masa trzajućih delova. Ovaj metod je primenjen kod brodskih topova. S druge strane, izrada topovske cevi manje mase korišćenjem boljih materijala ima za posledicu povećanje energije trzanja, a time i povećanje opterećenja lafeta oruđa. Od tipa konstrukcije i od snage oruđa zavisi koja će masa cevi obezbediti optimalne uslove.

Rad koćenja A_k , prikazan osenčenom površinom na dijagramima sila - put na slici 8, jednak je energiji trzajućih delova $(E_t)_\tau$ u trenutku završetka dejstva barutnih gasova. Za zadata dužinu koćenja X_k , maksimalno opterećenje lafeta $F_{1,max}$ je najmanje kod koćenja konstantnom silom. Kao upoređenje na slici 8 su prikazani dijagrami koćenja komoću opruge (sl. 4-4).

Maksimalno opterećenje lafeta $F_{1,max}$ zavisi od stepena neuniformnosti $F_{1,max}/F_{1,sr}$ na dijagramu sila - put, i najnepovoljnije je kod opruge bez inicijalnog opterećenja.

Dijagram hidrauličnog koćenja (crvena isprekidana linija na sl. 8-a) može značajno da se približi liniji konstantne sile koćenja. Kod hidrauličnih mehanizama u praksi je:

$$\frac{K_{max}}{K_{sr}} = 1.1 \div 1.2 \quad (36)$$



$F_{1,max}$ - maksimalna sila kočenja
 $F_{1,sr}$ - srednja sila kočenja
 A_k - rad kočenja
 $(E_t)_\tau$ - energija trzajućih delova na kraju pražnjenja cevi

$(X_{trz})_\tau$ - put trzanja na kraju pražnjenja cevi
 X_k - dužina kočenja
 λ - ukupna dužina trzanja

Slika 8. Stepen neuniformnosti $F_{1,max}/F_{1,sr}$ pri hidrauličnom kočenju i pri amortizovanju oprugom

Iz izraza $E_t = K_{sr} X_k$ dobija se da je

srednja sila kočenja:

$$K_{sr} = \frac{(E_t)_\tau}{X_k} \quad (37)$$

i

dužina kočenja:

$$X_k = \frac{(E_t)_\tau}{K_{sr}} \quad (38)$$

Ukupna dužina trzanja je:

$$\lambda = (X_{trz})_\tau + X_k \quad (39)$$

Primer 3: Haubica 105 mm

Za haubicu 105 mm iz prethodnih primera dobija se energija trzanja u trenutku pražnjenja cevi

$$(E_t)_\tau = \frac{m_{trz}}{2} (V_{trz})_\tau^2 = \frac{750}{2} \cdot 17.4^2 = 114000 \text{ Nm} = 114 \text{ kJ}$$

Za definisanu dužinu kočenja $X_k = 1.0 \text{ m}$ srednja sila kočenja je

$$K_{sr} = \frac{114000}{1.0} = 114000 \text{ N}$$

Ukupna dužina trzanja je

$$\lambda = 0.189 + 1.0 = 1.189 \text{ m}$$

Na osnovu bilansa energije na ovom primeru se može videti značaj pojedinih komponenti energije kod artiljerijskih oruđa uobičajene konstrukcije. Energija projektila na ustima cevi je

$$(E_p)_u = \frac{m_p}{2} V_0^2 = \frac{15}{2} \cdot 630^2 \approx 2980000 \text{ Nm} = 2980 \text{ kJ}$$

Vidi se da energija trzanja u trenutku pražnjenja cevi predstavlja samo oko 3.8 % energije projektila na ustima cevi. Kinetička energija barutnih gasova na kraju pražnjenja cevi je

$$(E_b)_\tau = \frac{m_b}{2} \overline{W}^2 = \frac{3}{2} \cdot 1200^2 \approx 2160000 \text{ Nm} = 2160 \text{ kJ}$$

Energetski bilans razmatranog primera je sledeći:

Ukupna mehanička energija, odnosno ukupna kinetička energija projektila, barutnih gasova i trzajućih delova

$$(E_p)_u + (E_b)_\tau + (E_{trz})_\tau \approx 5250 \text{ kJ}$$

od toga	57 %	predstavlja energija projektila	$(E_p)_u$
	41 %	čini energija barutnih gasova	$(E_b)_\tau$
	2 %	predstavlja energija trzajućih delova	$(E_{trz})_\tau$

Rotaciona energija projektila je toliko mala da može da se zanemari (<0.6 %).

Ukupna mehanička energija je samo deo (40 do 50 %) ukupne hemijske energije barutnog punjenja. Značajan deo energije odnose istekli barutni gasovi u obliku toplote, ili se takođe u obliku toplote odaje zidovima cevi i čaure.

Uticaj inicijalnog kočenja na trzanje (slika 4 - 3)

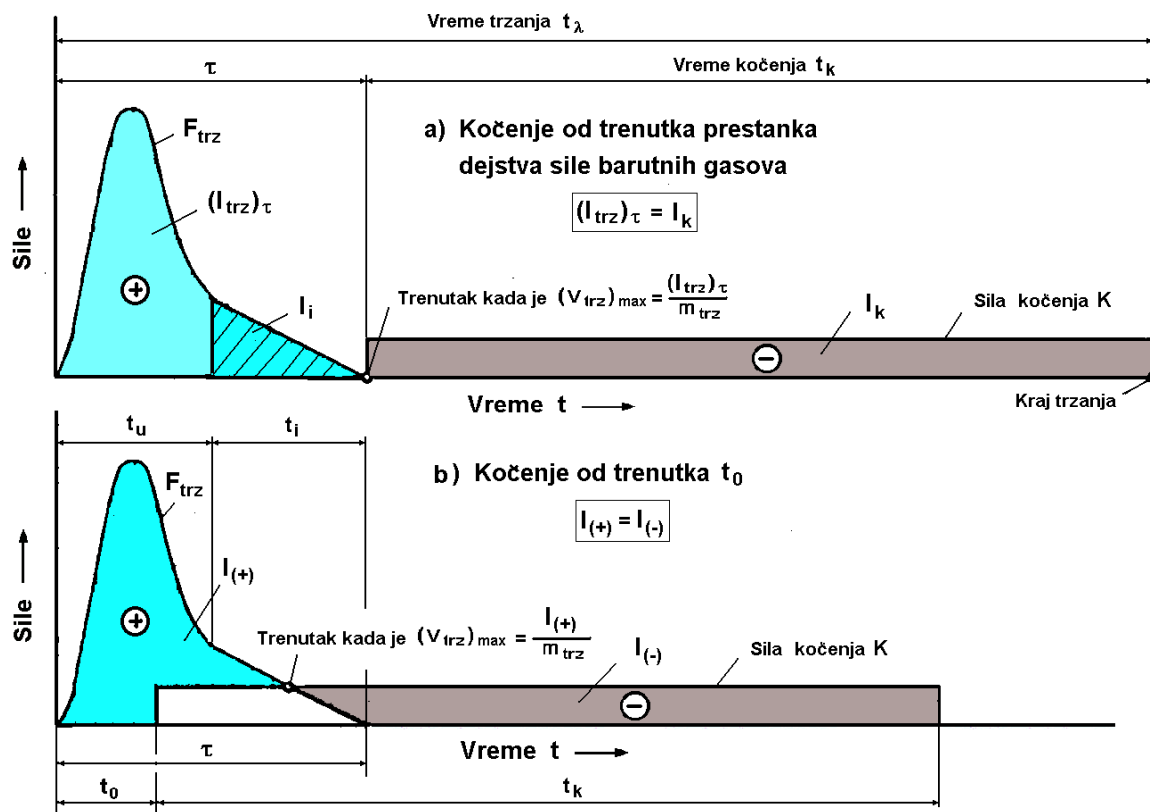
U prethodnom poglavlju razmotren je slučaj kada kočenje trzanja počinje u trenutku prestanka dejstva sile barutnih gasova. Sada ćemo razmotriti uticaj ranijeg započinjanja kočenja. Kočenje koje započinje upravo u trenutku početka dejstva sile barutnih gasova naziva se **inicijalno kočenje**.

Kod kočenja od trenutka prestanka dejstva sile barutnih gasova ukupni pozitivni impuls sile barutnih gasova $(I_{trz})_\tau$ mora do završetka trzanja potpuno da se apsorbuje negativnim impulsom kočenja I_k (sl.9-a). Isto važi i za slučajeve ranijeg otpočinjanja kočenja, bez obzira na trenutak početka kočenja silom **K**, za koju predpostavljamo da je konstantna (sl.9-b). Prema tome je:

$$(I_{trz})_\tau = I_k = K \cdot t_k \quad (40)$$

Trajanje kočenja:

$$t_k = \frac{(I_{trz})_\tau}{K} \quad (41)$$



Slika 9. Sile koje deluju na trzajuće delove u funkciji vremena

je nezavisno od trenutka započinjanja kočenja. Međutim, maksimalna brzina trzanja se razlikuje, kao što se vidi na slici 9. U slučaju 9-a iz ukupnog impulsa sile trzanja $(I_{trz})_{\tau}$ dobija se maksimalna brzina trzanja:

$$V_{trz,max} = \frac{(I_{trz})_{\tau}}{m_{trz}}$$

Međutim, u slučaju 9-b $V_{trz,max}$ je određena površinom pozitivnog impulsa $I_{(+)}$ koji na dijagramu leži iznad površine negativnog impulsa kočenja. Na ovaj način se ranijim otpočinjanjem kočenja smanjuje maksimalna brzina trzanja.

Različiti tokovi promene brzine u slučajevima 9-a i 9-b dovode do različitih ukupnih dužina trzanja, bez obzira na jednako vreme kočenja. Uticaj izbora trenutka započinjanja kočenja na ukupnu dužinu trzanja može relativno jednostavno da se izračuna superpozicijom dva odvojena procesa kretanja.

Kao što je prikazano na slici 10-1, kada su trzajući delovi opterećeni samo silom barutnih gasova (silom trzanja), $F_{trz}=f(t)$, ovo opterećenje će prouzrokovati kretanje trzajućih delova sa ubrzanjem a_1 , brzinom V_1 i putem trzanja X_1 (vidi jedn. (42) u tabeli 1).

Kada su trzajući delovi opterećeni samo silom kočenja K (sl. 10-2) jednačine (43) daju ubrzanje a_2 , brzinu V_2 i put trzanja X_2 .

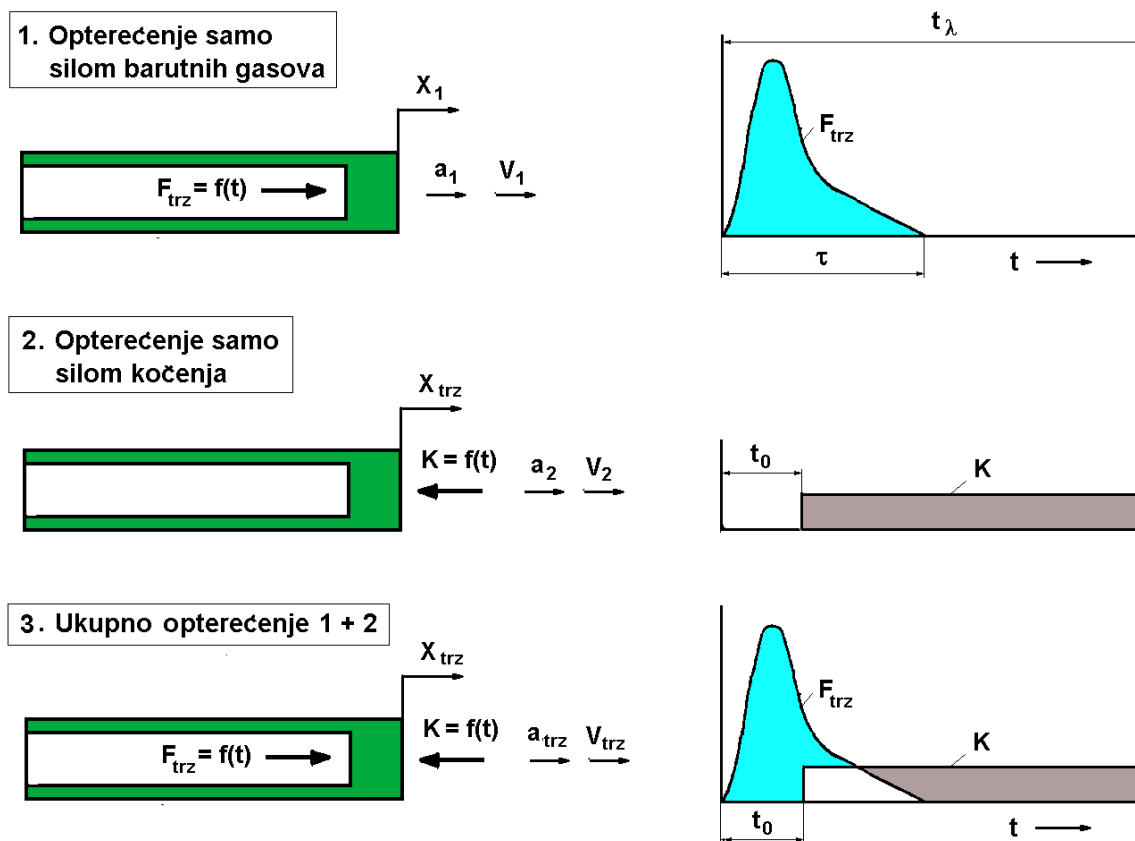
Superpozicijom navedena dva opterećenja, sabiranjem jednačina (42) i (43) dobijaju se relacije (44) za rezultujuće ubrzanje a_{trz} , brzinu V_{trz} i ukupni put trzanja λ .

Na ovaj način se ukupna dužina trzanja λ dobija proračunom pojedinačnog puta trzanja X_1 do trenutka završetka kočenja t_λ , kao da na trzajuće delove deluje samo sila barutnih gasova F_{trz} , i proračunom pojedinačnog puta trzanja X_2 do istog trenutka t_λ , kao da na trzajuće delove deluje samo sila kočenja K .

Dužina trzanja X_1 sastoji se iz puta trzanja $(X_1)_\tau$ do trenutka kada se završava dejstvo barutnih gasova, i puta trzanja do trenutka završetka kočenja t_λ , koji je određen brzinom trzanja $(V_{trz})_\tau$ definisanom jednačinom (22).

Tako je prema jednačini (24):

$$(X_1)_\tau = (X_{trz})_\tau = (X_{trz})_u + (X_{trz})_i \quad (42)$$



Slika 10. Proračun dužine trzanja pomoću superpozicije

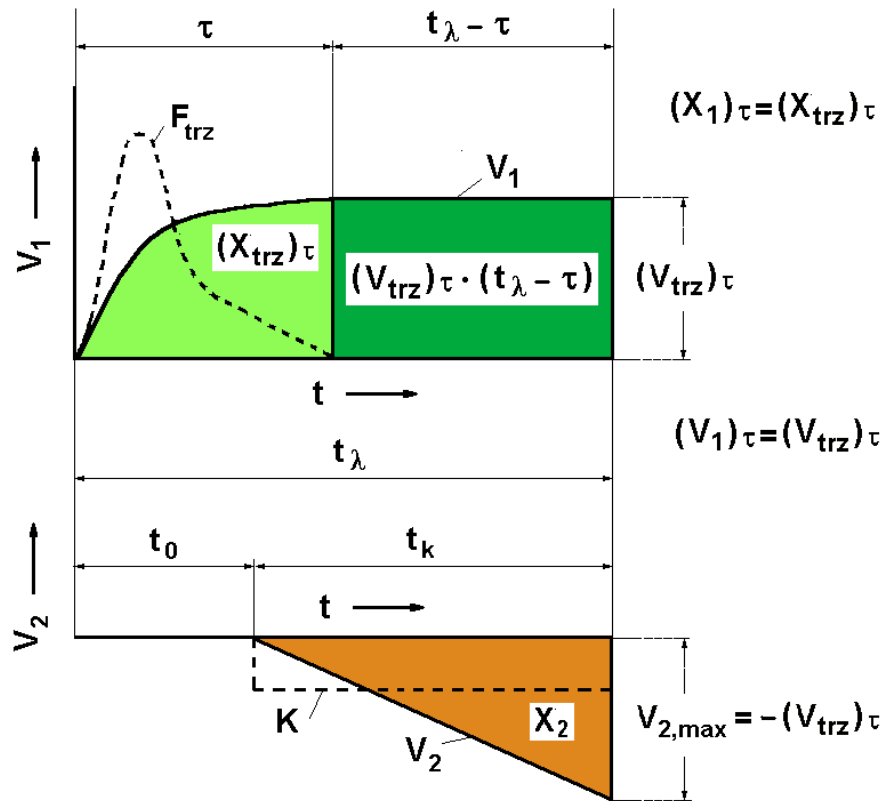
Na slici 11 putevi trzanja X_1 i X_2 javljaju se kao površine na dijagramima brzine. Dužina trzanja X_1 zavisi od trenutka započinjanja kočenja trzajućih delova:

$$X_1 = (X_{trz})_\tau + (V_{trz})_\tau \cdot (t_\lambda - \tau) = (X_{trz})_\tau + (V_{trz})_\tau \cdot t_k - (V_{trz})_\tau \cdot (\tau - t_0)$$

Za zadatu silu kočenja K dužina trzanja X_2 ne zavisi od trenutka kada počinje kočenje.

Tabela 1

	Ubrzanje	Brzina	Ukupan put trzanja	
1	$a_1 = \frac{F_{\text{trz}}}{m_{\text{trz}}} = f(t)$	$V_1 = \int_0^t a_1 dt = f(t)$	$X_1 = \int_0^{t_\lambda} V_1 dt = f(t)$	(43)
2	$a_2 = -\frac{K}{m_{\text{trz}}} = f(t)$	$V_2 = \int_0^t a_2 dt = f(t)$	$X_2 = \int_0^{t_\lambda} V_2 dt = f(t)$	
1 + 2	$a_{\text{trz}} = \frac{F_{\text{trz}} - K}{m_{\text{trz}}}$ $= a_1 + a_2$	$V_{\text{trz}} = \int_0^t a_{\text{trz}} dt$ $= V_1 + V_2$	$\lambda = \int_0^{t_\lambda} V_{\text{trz}} dt$ $= X_1 + X_2$	(44)



Slika 11. Određivanje dužina trzanja X_1 i X_2 pomoću dijagrama brzine

Ukupna dužina trzanja je:

$$\lambda = X_1 + X_2 = (X_{\text{trz}})_\tau + (V_{\text{trz}})_\tau \cdot t_k + X_2 - (V_{\text{trz}})_\tau \cdot (\tau - t_0)$$

U specijalnom slučaju kada kočenje započinje upravo u trenutku prestanka dejstva sile barutnih gasova ($t_0 = \tau$):

$$\lambda_0 = (X_{\text{trz}})_{\tau} + (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot t_k + X_2 \quad (45)$$

Za proizvoljni trenutak početka kočenja tokom dejstva sile barutnih gasova je

$$\lambda = \lambda_0 - (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot (\tau - t_0) = \lambda_{t_0} - \Delta\lambda \quad (46)$$

Smanjenje dužine trzanja usled ranijeg početka kočenja je

$$\Delta\lambda = (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot (\tau - t_0) \quad (47)$$

U specijalnom slučaju inicijalnog kočenja (od početka dejstva sile barutnih gasova, $t_0=0$) skraćanje dužine trzanja je

$$\Delta\lambda_A = (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot \tau \quad (48)$$

a u specijalnom slučaju započinjanja kočenja u trenutku izlaska projektila iz cevi ($t_0=t_u$):

$$\Delta\lambda_B = (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot (\tau - t_u) = (V_{\text{trz}})_{\tau} \cdot t_i \quad (49)$$

Umesto skraćanja dužine trzanja pri nepromenjenoj sili kočenja, uticaj inicijalnog kočenja može da se iskoristi za smanjenje sile kočenja pri nepromenjenoj dužini trzanja. Inicijalno kočenje obezbeđuje najlakšu i najkompaktniju konstrukciju lafeta. S druge strane slobodno trzanje u početnoj fazi smanjuje oscilovanje lafeta do izlaska projektila iz cevi i time smanjuje odskočni ugao (poboljšava preciznost gađanja).

Ukupna dužina trzanja sa kočenjem od trenutka prestanka dejstva sile barutnih gasova se umesto iz jednačine (45) može jednostavnije odrediti korišćenjem jednačina (38) i (39), pri čemu se dobija:

$$\lambda_0 = (X_{\text{trz}})_{\tau} + \frac{(E_t)_{\tau}}{K} \quad (50)$$

Primer 4: Haubica 105 mm

Sila kočenja $K = 114 \text{ kN}$

Dužina trzanja pri kočenju od trenutka završetka dejstva sile barutnih gasova

$$\lambda_0 = 1.189 \text{ m}$$

Skraćanje dužine trzanja usled inicijalnog kočenja (od početka dejstva sile barutnih gasova)

$$\Delta\lambda_A = 17.4 \cdot 17.5 \cdot 10^{-3} = 0.305 \text{ m}$$

Skraćanje dužine trzanja usled kočenja od trenutka izlaska projektila iz cevi

$$\Delta\lambda_B = 17.4 \cdot 8.2 \cdot 10^{-3} = 0.143 \text{ m}$$

Dužina trzanja pri inicijalnom kočenju

$$\lambda_A = 1.189 - 0.305 = 0.884 \text{ m}$$

Dužina trzanja pri inicijalnom kočenju od trenutka izlaska projektila iz cevi

$$\lambda_B = 1.189 - 0.143 = 1.046 \text{ m}$$

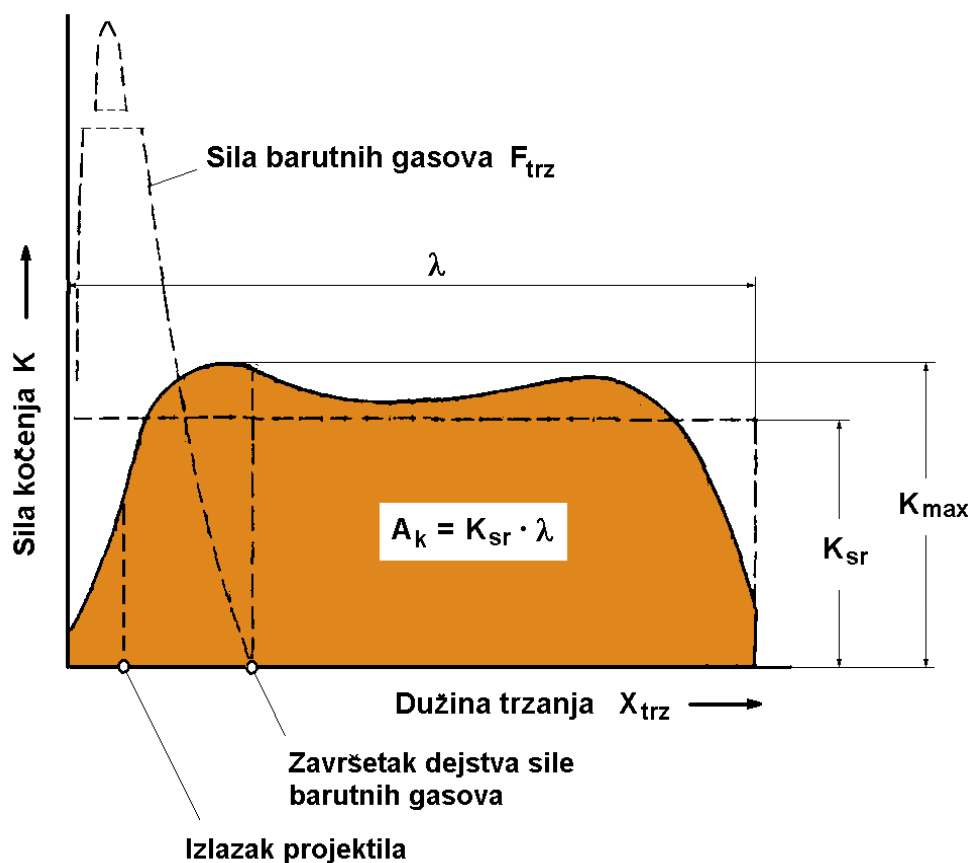
Navedeni primer pokazuje značajan uticaj inicijalnog kočenja na dužinu trzanja.

U praksi, sila kočenja hidraulične kočnice trzanja ne dostiže svoju punu vrednost trenutno, već raste postepeno tokom jednog prelaznog perioda koji obuhvata deo perioda dejstva sile barutnih gasova (slika 12). Stvarna ukupna dužina trzanja će imati vrednost između dužine trzanja koja odgovara inicijalnom kočenju i dužine trzanja bez inicijalnog kočenja, odnosno u prethodnom primeru između 0.884 m i 1.189 m.

Za proračune pri preliminarnom projektovanju sledeća približna formula daje zadovoljavajuće rezultate:

$$\lambda = \frac{(E_t)_\tau}{K_{sr}} \quad (51)$$

što u gornjem primeru daje $\lambda = \frac{114 \text{ kJ}}{114 \text{ kN}} = 1.0 \text{ m}$



Slika 12. Dijagram sile kočenja

Treba obratiti pažnju da je u jednačini (51) rad kočenja $A_k = \lambda K_{sr}$ izjednačen sa kinetičkom energijom trzajućih delova pri slobodnom trzanju. Međutim, u opštem slučaju rad kočenja je jednak radu sile barutnih gasova

$$A_{trz} = \int F_{trz} dX_{trz}$$

Važno je istaći da ovaj rad nije nezavistan od karaktera kretanja, za razliku od impulsa sile barutnih gasova $(I_{trz})_\tau$ (vidi jednačinu 40), već se smanjuje sa skraćivanjem dužine trzanja pri inicijalnom kočenju. Jednakost $A_k = (E_t)_\tau$ važi samo u slučaju kada kočenje počinje upravo u trenutku prestanka dejstva barutnih gasova. Tako je sa veličinom $(E_t)_\tau$ u jednačinu (51) uvršćena praktično maksimalna vrednost energije, čime je obezbeđeno da izbor dužine trzanja λ bude veći od minimalno dozvoljenog.

Na isti način približna formula

$$K_{sr} = \frac{(E_t)_\tau}{\lambda} \quad (52)$$

obezbeđuje određivanje vrednosti srednje sile kočenja sa izvesnim stepenom sigurnosti.

Maksimalna vrednost neuniformne hidraulične sile kočenja je $K_{max} = (1.1 \div 1.2) K_{sr}$.

Opterećenje lafeta pri amortizaciji cevi oruđa pomoću opruge

(slika 4-4, 4-5)

U mnogim slučajevima je razmatrano ugrađivanje opruga između cevi i lafeta, da bi se u kratkom vremenskom intervalu sprečilo prenošenje velikih opterećenja sa cevi oruđa na lafet, ili bar ublažilo dejstvo opterećenja na lafet. Međutim, ovaj metod može da bude uspešan samo pod određenim uslovima. Sada ćemo pokazati koja su ograničenja amortizacije cevi oruđa pomoću opruge.

U slučaju da trzajuća masa koja se slobodno trza udara u oprugu po završetku dejstva sile barutnih gasova (slika 4-4), ukupna energija slobodnog trzanja $(E_t)_\tau$ određena jednačinom (35) mora da se transformiše u potencijalnu energiju opruge. Kao što je poznato (vidi sliku 8), pri istoj dužini trzanja opterećenje lafeta je znatno nepovoljnije pri amortizaciji pomoću opruge sa linearnom karakteristikom, nego pri hidrauličnom kočenju sa konstantnom silom kočenja.

Isto kao i kod hidrauličnog kočenja, i kod amortizacije je povoljnije da sila opruge počne da deluje od samog početka dejstva sile barutnih gasova (slika 4-5), tako da praktično samo ovaj slučaj treba da bude razmatran.

Kompletan proračun dejstva opruga u dinamičkim uslovima opterećenja je veoma složen, tako da će ovde biti date samo osnovne relacije, pri čemu će biti zanemaren uticaj udarnih talasa koji se javljaju u oprugama.

U slučaju pravougaonog impulsa sile koji deluje na masu oslonjenu oprugom (slika 13-a), ponašanje sistema se može jednostavno odrediti. Dokle god deluje iznenadna sila F_0 , masa m , pod dejstvom opruge sa krutošću C , osciluje oko nove ravnotežne tačke, čija koordinata je $X_0 = F_0/C$. Sila koja deluje na oslonac je $F_1 = C \cdot X$. Kao što pokazuje dijagram sila-vreme, maksimalna vrednost sile na oslonac

$$F_{1,\max} = 2F_0$$

dostiže se tokom perioda τ , u slučaju kada je polovina perioda prirodnih oscilacija sistema $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$ manja od vremena efektivnog delovanja sile F_0 , tj. kada je

$$\frac{T}{2} < \tau \quad \text{što odgovara } \textbf{tvrdj} \textbf{o} \textbf{j} \textbf{ opruzi} \textbf{ sa velikom krutošću opruge } C.$$

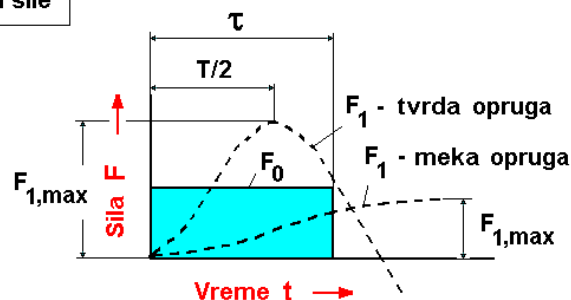
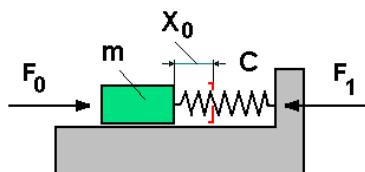
U slučaju kada je $\frac{T}{2} > \tau$ (**meka opruga**), impuls sile F_0 prestaje da deluje pre nego što se dostigne maksimalna vrednost $F_{1,\max}$, tako da je

$$F_{1,\max} < 2F_0$$

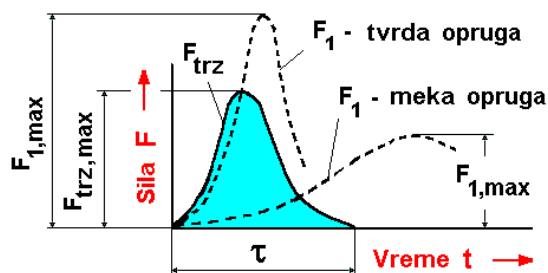
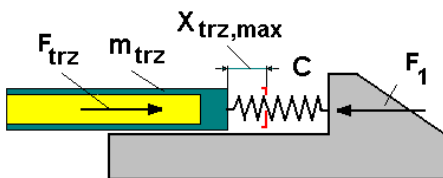
Samo sa odgovarajućom mekom oprugom može se postići da maksimalna sila na oslonac $F_{1,\max}$ bude manja od sile F_0 .

$$F_{1,\max} < F_0$$

a) Opterećenje pravougaonim impulsom sile



b) Opterećenje impulsom sile barutnih gasova



F_{trz} - sila barutnih gasova
 F_1 - opterećenje lafeta
 m_{trz} - trzajuća masa

C - krutost opruge
 X_{trz} - put trzanja
 τ - vreme dejstva sile barutnih gasova

Slika 13. Opterećenje lafeta pri amortizaciji trzanja pomoću opruge

Suštinski slične relacije se dobijaju i pri dejstvu impulsa sile barutnih gasova na trzajuću masu (slika 13-b). Ovaj impuls karakterišu maksimalna sila barutnih gasova $F_{tr,max}$ i vreme trajanja njenog dejstva τ . Slično kao i kod pravougaonog impulsa, odnos $F_{1,max}/F_{tr,max}$ zavisi od toga kakva je relacija između perioda prirodnih oscilacija mase koja se amortizuje oprugom i vremena trajanja opterećenja τ .

Ako krivu sile barutnih gasova aproksimiramo prostom matematičkom funkcijom, naprimer sinusnom funkcijom, maksimalno opterećenje lafeta $F_{1,max}$ može da se proračuna rešavanjem diferencijalne jednačine oscilovanja za bilo koju vrednost trzajuće mase m_{tr} i krutosti opruge C .

Osnovni faktor od koga zavisi praktična upotrebljivost sistema amortizovanja pomoću opruge je maksimalna dužina sabijanja opruge (maksimalna dužina trzanja) $X_{tr,max}$. Zato odnos $F_{1,max}/F_{tr,max}$ na slici 14 nije predstavljen na uobičajen način u funkciji prirodne frekvencije oscilovanja sistema, već u funkciji relativne maksimalne dužine sabijanja opruge $X_{tr,max}/X_v$, gde je X_v referentna dužina.

Kriva 5 na slici 14, proračunata za slučaj 4-5 (sila opruge deluje od početka trzanja) važi za bilo koji impuls sile barutnih gasova, trzajuću masu i amortizaciju oprugom linearne karakteristike (bez preopterećenja), pri čemu je referentna dužina X_v jednaka

$$X_v = \frac{(E_t)_\tau}{F_{tr,max}} \quad (53)$$

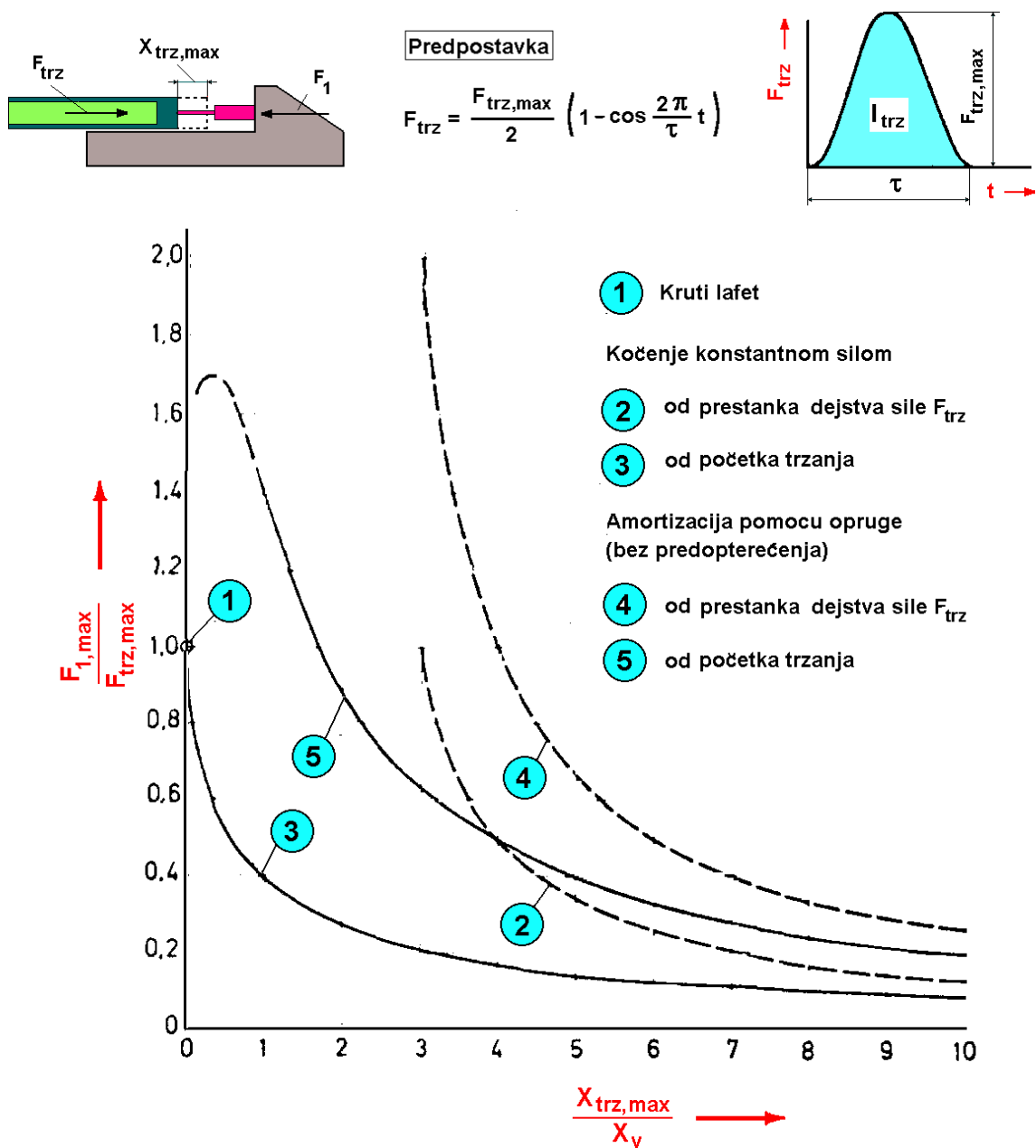
U jednačini (53) $(E_t)_\tau$ je energija trzajućih delova na kraju dejstva sile barutnih gasova pri slobodnom trzanju, a $F_{tr,max}$ je maksimalna sila barutnih gasova. Tako je referentna dužina X_v veličina koja ne zavisi od načina lafetiranja oruđa, već prema jednačini (53) zavisi samo od unutrašnjebalističkih karakteristika i od trzajuće mase oruđa.

Naprimer, kod nekih standardnih sistema klasičnog naoružanja referentna dužina X_v ima sledeće vrednosti:

Top	90 mm	$X_v = 37$ mm
Top	105 mm	$X_v = 43$ mm
Haubica	105 mm	$X_v = 50$ mm
Minobacač	81 mm	$X_v = 166$ mm
Minobacač	120 mm	$X_v = 73$ mm
Pešadijska puška		$X_v = 1.5$ mm
(čvrsto zabravljena)		

Visoke vrednosti referentne dužine X_v kod minobacača su posledica relativno malih masa cevi. S druge strane mala vrednost X_v kod pešadijske puške može se objasniti velikom vrednošću odnosa mase trzajućih delova i mase projektila (m_{tr}/m_p).

Karakter krive 5 na slici 14, koja se odnosi na amortizovanje pomoću opruge (slučaj 4-5), pokazuje da je sve do odnosa puteva $X_{tr,max}/X_v=1.75$ odnos sila $F_{1,max}/F_{tr,max}$ je veći od jedinice. To znači da amortizacija sa dužinom sabijanja opruge $X_{tr,max}<1.75 X_v$ nema svrhe, odnosno čak je štetna. Smanjenje opterećenja lafeta na oko 50 % se postiže tek pri dužini sabijanja opruge $X_{tr,max}=4 X_v$. Za normalne topove i haubice to bi bila dužina sabijanja opruge od 150 do 200 mm, dok bi za minobacač 81 mm ova dužina iznosila čak 580 mm.



Slika 14. Dijagram opterećenja u funkciji dužine sabijanja opruge i puta kočenja

Uslovi su mnogo povoljniji kod pešadijske puške, pošto je tokom opaljenja ona oslonjena na amortizujuće rame strelca. Sa dužinom sabijanja opruge od $30 \cdot X_v = 45 \text{ mm}$, opterećenje ramena strelca se smanjuje na oko 7 % maksimalne sile barutnih gasova, tj na oko 1000 N.

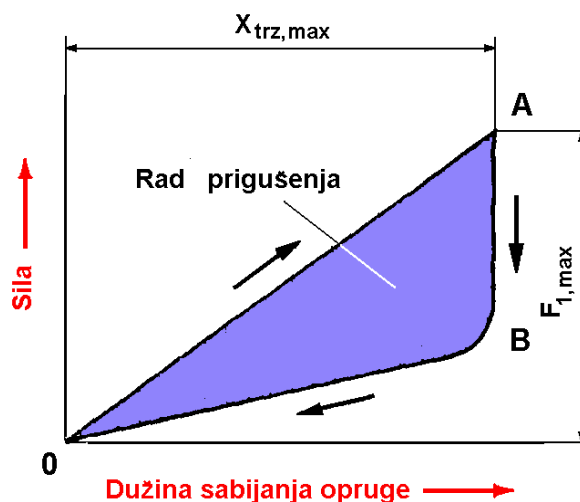
U mnogim slučajevima odnos $X_{\text{trz,max}}/X_v$ može da se pomeri u povoljniju oblast (poveća), tako što se poveća masa trzajućih delova. Naprimer, ako minobacač 81 mm, čija cev ima masu od samo 12 kg, treba da se ugradi na vozilo sa lafetom tipa opružnog amortizera, trzajuća masa može pomoću dodatne mase od 200 kg da se poveća na 212 kg. Na ovaj način se referentna dužina X_v smanjuje na 9 mm, tako da sa maksimalnim sabijanjem opruge $4 \cdot X_v = 36 \text{ mm}$ može da se postigne efektivno smanjenje opterećenja vozila tokom opaljenja.

Na slici 14 su u svojstvu primera date i krive koje odgovaraju drugim tipovima lafetiranja oruđa, prikazanim na slici 4. Čak i u slučajevima 2, 3 i 4, uvođenje referentne dužine $X_v = (E_t)_t / F_{tr, max}$ omogućuje da se kvalitetno predstavi zavisnost opterećenja lafeta od maksimalne dužine trzanja. Sa slike 14 se jasno vidi da za zadatu maksimalnu dužinu trzanja, naprimer $X_{tr, max} / X_v = 8$, kočenje konstantnom silom (koje treba da počne što je pre moguće - slučaj 3) daje ubedljivo najmanje opterećenje lafeta.

Ucrtane krive predstavljaju granične slučajeve, a zavisnosti koje odgovaraju uslovima unutar određenih granica mogu da se dobiju interpolacijom. Tako naprimer, zavisnosti za silu kočenja koja raste tokom dejstva sile barutnih gasova leže između krivih 2 i 3, a zavisnosti za amortizaciju pomoću opruge sa predopterećenjem se nalaze između krivih 5 i 3.

Uticaj prigušenja opruge

Neprigušena opruga bila bi praktično neupotrebljiva za amortizovanje trzanja cevi oruđa pošto bi se ukupna energija trzanja kompletno pretvorila u energiju vraćanja trzajućih delova. U slučaju višeslojne tanjiraste opruge do 30% rada opruge transformiše se u toplotu, a u slučaju tanjirastih opruga rad sile trenja je oko 67 % rada opruge.



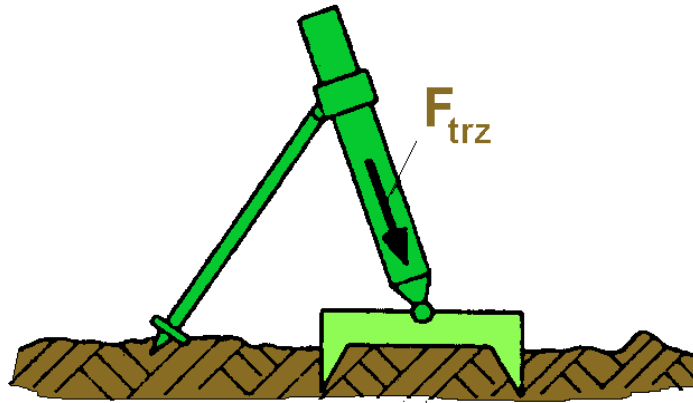
Slika 15. Dijagram rada frikciione opruge (prstenaste opruge)

Krutost opruge, koja odgovara liniji OA na dijagramu rada prigušene opruge (slika 15), uzima se kao osnova za proračun trzanja cevi. Na ovaj način je rad prigušenja koji se vrši tokom trzanja već uzet u obzir.

Kod hidraulične kočnice se kompletan rad izvršen tokom trzanja transformiše u toplotu. Zato je za vraćanje trzajućih delova u prednji položaj, pored hidraulične kočnice, neophodno prisustvo povratnika, u kome se deo energije trzanja akumulira u obliku potencijalne energije.

Kruto lafetiranje cevi oruđa

Kruto lafetiranje cevi oruđa se u praksi primenjuje samo kod minobacača, gde se sila barutnih gasova F_{tr} pod velikim uglom prenosi na tle preko krute podloge (slika 16).

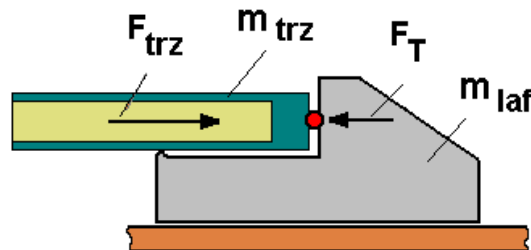


Slika 16. Kruto lafetiranje minobacača

Primeri:	Minobacač 81 mm	$F_{1,max} = 412 \text{ kN}$
	Minobacač 120 mm	$F_{1,max} = 1620 \text{ kN}$

Treba naglasiti da je kod krutog lafetiranja cevi oruđa maksimalno opterećenje lafeta $F_{1,max}$ jednako maksimalnoj sili barutnih gasova $F_{trz,max}$ samo ako je oslonac **potpuno** krut. Bilo kakva elastičnost oslonca, čak i veoma mala, dovodi do značajnog povećanja maksimalnog opterećenja lafeta, što pokazuje kriva 5 na slici 14. Naprimer, elastično pomeranje od samo 0.2 X_v , odnosno oko 10 mm kod oruđa srednjeg kalibra, dovoljno je da omogući povećanje sile $F_{1,max}$ do vrednosti 1,6 $F_{trz,max}$.

Uslovi su potpuno različiti kada je cev oruđa potpuno čvrsto oslonjena na lafet, a lafet može slobodno da se kreće unazad ili da bude kočen na određenoj dužini trzanja (slika 17).



Slika 17. Kruto oslanjanje cevi oruđa sa trzanjem lafeta

Budući da je ubrzanje lafeta $a_{laf} = F_T/m_{laf}$ jednako ubrzanju celog sistema

$$a_{tot} = \frac{F_{trz}}{m_{cev} + m_{laf}}$$

maksimalna sila koja deluje na pričvršćivač postolja oruđa je

$$F_{T,max} = \frac{m_{laf}}{m_{cev} + m_{laf}} F_{trz,max} \quad (54)$$

Energija trzanja celog sistema dobija se ako se u jednačinu (35) uvrsti kao masa trzajućih delova

$$m_{\text{trz}} = m_{\text{cev}} + m_{\text{laf}}$$

Ako je cev oruđa kruto oslonjena na relativno tešku platformu vozila (tenk), pri čemu platforma može da se pokreće na oprugama vozila, onda se dobijaju sasvim povoljne vrednosti energije trzanja sistema $(E_t)_\tau$ i referentne dužine X_v , a time i povoljno opterećenje opruga.

Primer 5: Haubica 105 mm montirana na platformu vozila mase 10 t

Maksimalna sila na pričvršćivač postolja $F_{T,\text{max}} = \frac{10000}{750 + 10\,000} 2310 = 2150 \text{ kN}$

Energija trzajućih delova haubice 105 mm $(E_t)_\tau = 114 \text{ kJ}$, izračunata u primeru 3 (str. 14), smanjuje se u slučaju krutog lafetiranja haubice na vozilo u odnosu $\frac{m_{\text{trz}}}{m_{\text{trz}} + m_{\text{laf}}}$, tako da je

$$(E_{\text{trz}})_\tau = \frac{750}{750 + 10000} \cdot 114 = 7.95 \text{ kJ}$$

Referentna dužina je $X_v = \frac{(E_{\text{trz}})_\tau}{F_{\text{trz,max}}} = \frac{7.95 \text{ kNm}}{2310 \text{ kN}} = 0.0034 \text{ m}$

Za maksimalnu dužinu sabijanja opruge $X_{\text{trz,max}} = 34 \text{ mm} = 10 \cdot X_v$ kriva 5 na slici 14 daje $F_{1,\text{max}}/F_{\text{trz,max}} = 0.2$, tako da je maksimalno opterećenje opruge $F_{1,\text{max}} = 0.2 \cdot 2310 = 462 \text{ kN}$.